

大空隙沥青混合料渗透模型

关彦斌^{1,2}, 孔永健³, 张金喜¹

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中交路桥技术有限公司, 北京 100029;
3. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 利用 cosmos 图像分析软件对大空隙沥青混合料试件切片进行图像分析, 获取空隙半径、空隙间距等空隙参数用以确定大空隙沥青混合料渗透模型网格的划分及初始数值的输入, 采用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法建立渗透模型, 根据 Hagen-Poiseuille 原理及松弛迭代法建立数学模型。结果表明, 数值模拟渗透结果与室内渗透试验结果具有一致性, 该模型可以模拟不同水头高度下任意最大骨料粒径、任意开级配的大空隙沥青混合料的渗透系数, 为大空隙沥青混合料设计提供了有效方法。

关键词: 道路工程; 大空隙沥青混合料; 渗透模型; 数值模拟; 渗透系数

中图分类号: U 416. 27

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2010) 10 - 1363 - 07

渗透系数是描述大空隙沥青混合料渗透能力的主要参数, 国内外许多学者在混合料渗透模型领域做了大量工作并取得了许多重要的研究成果, 如 Al-Omari^[1]、Masad^[4-6]、Muhammed^[3] 等学者研究了不同的模型估计混合料渗透系数^[4-6], 而大部分模型都是 semi 分析, semi 分析模型大多基于将空隙结构 (由连通空隙、半连通空隙和封闭空隙构成) 近似成简单的几何形状 (例如管子或圆柱体), 很难讨论有效空隙 (连通空隙) 孔径的大小、有效空隙分布等对渗透的影响, 而这些参数是影响大空隙沥青混合料渗透能力的主要因素^[7-8], 以此来探讨渗透模型不但可以准确模拟其渗透能力, 还可以为大空隙沥青混合料配合比设计及提高沥青混合料的物理力学性能提供指导。

1 渗透模型

1.1 基本假设

由于沥青混合料中的骨料是随机堆填的, 由骨料形成的空隙也具有随机性。为了能较准确地描述大空隙沥青混合料中有效空隙的分布情况, 采用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 随机模拟的方法^[9] 建立渗透模型, 渗透模型的建立基于 4 个假设:

- 1) 渗透模型由相互连通的、等长度的有效空隙网格构成, 有效空隙及有效空隙半径的大小随机分布, 有效空隙结合点处于导通状态;
- 2) 流体为均匀连续介质, 在上述有效空隙中渗透;
- 3) 流体在有效空隙中的渗透遵循马尔科夫过程, 不考虑其在有效空隙横截面上的速度分布, 流体在上述有效空隙中随机渗透, 渗透到有效空隙结合点后, 完全混合再进入下一有效空隙渗透, 且与前一有效空隙无关;
- 4) 流体在渗透模型中的渗透处于稳定状态, 没有流体微团吸附在类似死穴的空隙中。

收稿日期: 2009-03-19.

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (20090450269)。

作者简介: 关彦斌 (1974—), 男, 哈尔滨人, 讲师。

1.2 渗透模型的建立

图1所示为最大骨料粒径分别为16和20mm的大空隙沥青混合料试件切片显示出的空隙(有效空隙,下同)分布,用节点和空隙形成的网格来表示其分布状态.为了详细直观说明混合料有效空隙分布,采用的空隙网格为规则正方形网格.如图2(a)所示.

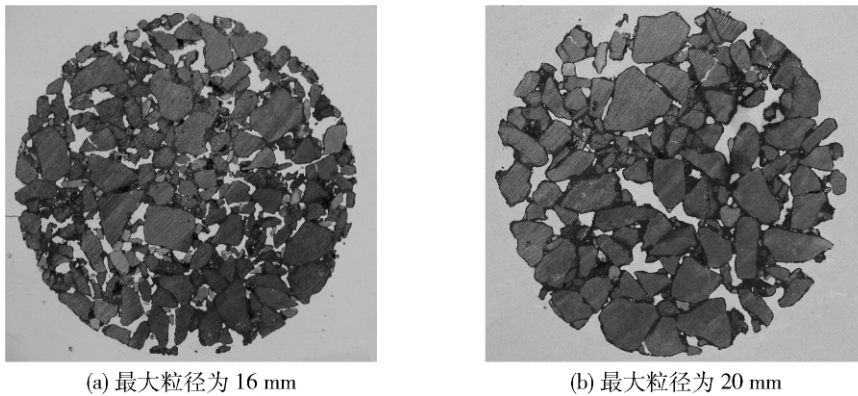


图1 大空隙沥青混合料试件切片
Fig.1 Porous asphalt mixture sample slices

室内试验采用标准马歇尔试件,最大骨料粒径为16mm,最小骨料粒径为2.36mm,同时考虑4.75mm的骨料粒径,依据试件尺寸及最大骨料粒径,将大空隙沥青混合料空隙分布划分为 6×6 的网格进行模拟, 6×6 表示空隙节点的数量,空隙间距取为18mm,即 $l = 18\text{mm}$.这里暂不考虑空隙节点的大小变化,将其取为定值 $4.75\text{mm} \times 4.75\text{mm}$.满足模拟要求,服从一定分布且随机分布于空隙网格中的数据可以很容易通过随机数生成器得到,若要对其赋值,以得到一个便于存储与运算的矩阵数组,则必须对网格做进一步处理.空隙网格中有横向空隙与竖向空隙,将网格继续细化以便于数组运算,如图2(b)所示.图2(b)中的虚线为附加线,附加线与图2(a)中的网格线相交后形成大量节点,将原 6×6 的网格扩充为 11×11 的网格,图2(b)中虚线与实线相交所得的点可以用来表示图2(a)中所示的空隙.虚线与虚线相交所得的点都是虚拟点,没有实际意义,将它们统一赋值为0.实线与实线相交点为图2(a)中的空隙节点,对实际过程没有影响,赋值为0.图2(b)中只有虚线与实线相交点有实际意义,代表空隙大小,对过程有影响.

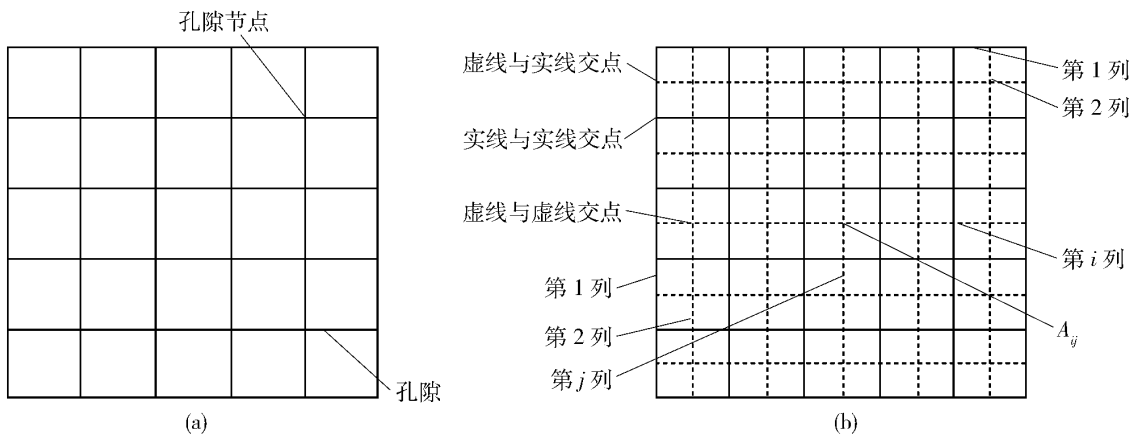


图2 孔隙网格的细化
Fig.2 The refinement of gap grid

1.3 参数分析

空隙网格可以由 6 个参数进行描述,分别为空隙数、节点数、两节点间距离、配位数、平均空隙半径及分布率。分布率由一随机数发生器产生。如果采用 6×6 的网格进行模拟,其空隙节点数为 36,空隙数为 60。采用 MIC-840-01 型混凝土空隙组织测定仪,利用 cosmos 图像分析软件对试件切片进行图像分析,获取空隙参数以确定大空隙沥青混合料空隙模型网格的划分及初始数值的输入,对图 3 所示的试件切片进行图像分析,分析结果见表 1。

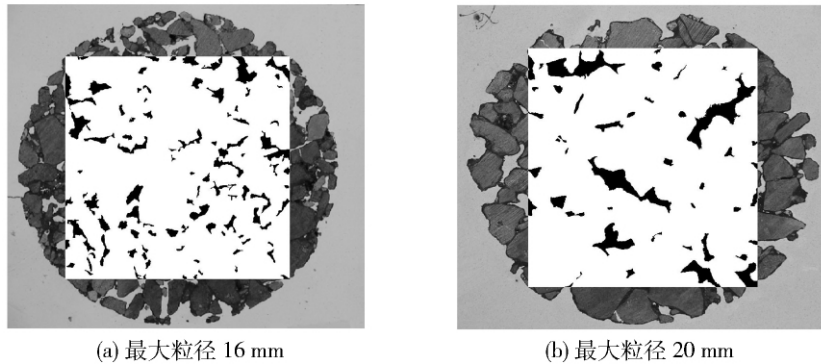


图 3 混合料试件切片图像获取分析图

Fig. 3 Image analysis of sample slices

表 1 混合料试件切片图像分析结果

Table 1 Image analysis results of mixture specimen slice

类别	空隙/条		空隙面积/cm ²		空隙间距/cm		圆形度		等价圆直径/cm	
	a*	b*	a	b	a	b	a	b	a	b
最小值			0.007 7	0.007 1	0.343 3	0.768 9	0.147 3	0.117 7	0.099 1	0.095 0
最大值			0.341 5	0.937 8	3.508 2	5.500 45	0.913 6	0.857 5	0.659 4	1.092 7
平均值	59	45	0.054 3	0.110 6	1.925 8	3.136 7	0.445 3	0.472 6	0.231 4	0.286 0
合计值			3.201 7	4.975 0			26.274 3	21.266 0	13.655 2	12.868 6
标准偏差			0.060 4	0.212 1			0.199 1	0.202 5	0.124 6	0.242 9

* : a 表示最大粒为 16 mm 混合料试件; b 表示最大粒径为 20 mm 混合料试件。

空隙半径尺寸服从 Rayleigh 分布式^[10]

$$\begin{cases} f(r) = 2r\alpha^2 e^{-\alpha^2 r^2} \\ \int_0^\infty f(r) dr = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 α^{-1} 是平均空隙半径,对于最大骨料粒径为 16 mm,取 1.2 mm; r 是空隙半径。

由上述分析得到平均空隙半径由 cosmos 图像分析获得,分布率为 Rayleigh,空隙数由最大骨料粒径划分网格数(参考实测值),节点数根据划分的网格得到,两节点间距离由最大骨料粒径及实测空隙间距得到,配位数为 4。

2 渗透模型数值解

2.1 数学模型的建立

节点处压力是通过在每个节点处建立流量平衡方程求解的。在有 n 个节点的空隙网格模型中,可建立 n 个线性方程,有 n 个未知压力。对空隙网格模型中的任一节点 $i(j=1, 2, \dots, n)$, n 为细化后网格的

式中 λ 为沿程阻力系数; ξ 为局部水头损失系数; d 为空隙直径(cm) .

2.3 渗透模型数值解

首先,实现 6×6 的空隙模型网格中 60 个空隙半径的随机数,先采用无量纲的方法计算方程($A - B$) $X = 0$,利用数值计算产生矩阵 A 、 B 并对其进行赋值,采用松弛迭代法求解.

最大骨料粒径分别为 16 和 20 mm 混合料渗透模型数值计算结果与室内渗透试验结果如表 2、3 所示.

表 2 最大骨料粒径为 16 mm 的渗透模型数值计算结果对比

Table 2 Maximum aggregate size is 16 mm

p_1/mm	$Q_{\text{模拟}}/\text{mm}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	$Q_{\text{试验}}/\text{mm}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	$k_{\text{模拟}}/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$k_{\text{试验}}/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{\text{有效模拟}}/\text{mm}^3$
5	1 352. 7	1 097. 6	3. 34	2. 71	130 329. 8
10	2 705. 4	2 195. 2	3. 34	2. 71	130 329. 8
15	4 058. 1	3 292. 7	3. 34	2. 71	130 329. 8
20	5 410. 8	4 390. 3	3. 34	2. 71	130 329. 8
25	6 763. 5	5 487. 9	3. 34	2. 71	130 329. 8
30	8 116. 2	6 585. 5	3. 34	2. 71	130 329. 8

表 3 最大骨料粒径为 20 mm 的渗透模型数值计算结果对比

Table 3 Maximum aggregate size is 20 mm

p_1/mm	$Q_{\text{模拟}}/\text{mm}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	$Q_{\text{试验}}/\text{mm}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	$k_{\text{模拟}}/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$k_{\text{试验}}/\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{\text{有效模拟}}/\text{mm}^3$
5	2 000. 7	1 672. 7	4. 94	4. 13	180 225. 7
10	4 001. 4	3 345. 3	4. 94	4. 13	180 225. 7
15	6 002. 1	5 018. 1	4. 94	4. 13	180 225. 7
20	8 002. 8	6 690. 8	4. 94	4. 13	180 225. 7
25	10 003. 5	8 363. 5	4. 94	4. 13	180 225. 7
30	12 004. 2	10 036. 2	4. 94	4. 13	180 225. 7

2.4 数值模拟结构分析

从表 2、3 得知,利用大空隙沥青混合料渗透模型模拟不同最大骨料粒径(分别为 16 和 20 mm)混合料的渗透结果与混合料室内渗透试验结果具有一致性. 数值模拟的渗透量及渗透系数数值比室内试验结果偏大,原因为空隙沿程阻力系数设置较小、空隙半径取值较大或空隙间距取值较大所致;随着最大骨料粒径的增大,由其配制混合料的渗透系数及有效空隙体积越大.

3 结论

- 1) 数值模拟的渗透量、渗透系数及有效空隙率(有效空隙体积)与室内试验结果具有一致性.
- 2) 可以模拟不同水头高度下任意最大骨料粒径、任意开级配的大空隙沥青混合料渗透过程.
- 3) 为不同渗透能力的大空隙沥青混合料配合比设计提供了有效方法.

参考文献:

- [1] Al-OMARI A, TASHMAN L, MASAD E, et al. Proposed methodology for predicting HMA permeability [J]. Journal of the Association of the Asphalt Paving echnologists, 2002, 71(2): 30-57.
- [2] MASAD E, AL-OMARI A. Three dimensional simulation of fluid flow in X-ray CT images of porous media [J]. Int J Numer Anal Meth Geomech, 2004, 28: 1327-1360.
- [3] MUHAMMED E K. Modeling moisture transport in asphalt pavements [D]. Baltimore County, USA: University of Maryland,

- 2005.
- [4] TASHMAN L , WANG L , THYAGARAJAN S. Microstructure characterization for modeling HMA behaviour using imaging technology [J] . Road Materials and Pavement Design , 2007 , 8 (2) : 207-238.
- [5] JACOB B , BUCHLIN J M. Modeling and applications of transport phenomena in porous media [M]. Dordrecht , the Netherlands: Kluwer Academic Publishers , 1991.
- [6] MAUPIN G W. Asphalt permeability testing , specimen preparation and testing variability [R]. Charlottesville , USA: Transportation Research Council , 2001.
- [7] 张嘉林. 多孔排水沥青混合料空隙精细描述与分布特性研究 [D]. 西安: 长安大学公路学院 , 2008.
ZHANG Jia-lin. Research on porous asphalt mixture void description and distribution characteristic [D]. Xi'an: College Road , Chang'an University , 2008. (in Chinese)
- [8] 关彦斌. 大空隙沥青路面的透水机理及结构设计研究 [D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院 , 2008. 6.
GUAN Yan-bin. Study on infiltration mechanism and structure design of porous asphalt pavement [D]. Beijing: School of Civil Engineering and Architecture , Beijing Jiaotong University , 2008. 6. (in Chinese)
- [9] 徐钟济. 蒙特卡罗方法 [M]. 上海: 上海科技出版社 , 1985. 6.
- [10] SAHIMI M. Dispersion in flow through porous media-I , One-Phase Flow [J]. Chemical Engineering Science , 1986 , 41: 2103-2122.
- [11] 孔祥言. 高等渗流力学 [M]. 北京: 科学技术出版社 , 2004.

Permeability Model of Porous Asphalt Mixture

GUAN Yan-bin^{1,2} , KONG Yong-jian³ , ZHANG Jin-xi¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering , Beijing University of Technology , Beijing 100124 , China;

2. CCCC Road and Bridge Consultants Co. , Ltd , Beijing 100029 , China;

3. School of Civil Engineering and Architecture , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China)

Abstract: The void parameters such as void radius and void space are achieved by image analysis of porous asphalt mixture sample slice through cosmos image analyzing software , so as to set up the grid sizing of the permeability model of the porous asphalt mixture and the input of original value. The method of Monte Carlo is used to set up the permeability model. The mathematics model abstracted is based on the Hagen-Poiseuille theory and the flab iterative method. The result shows that the numerical simulation permeability outcome is consistent with the indoor permeability test outcome. The model can simulate any maximum conglomerate diameter at different water surface levels and the permeability coefficient of any open-graded porous asphalt mixture. The model offers an effective method for designing of the porous asphalt mixture.

Key words: road engineering; porous asphalt mixture; permeability model; numerical simulation; permeability coefficient

(责任编辑 郑筱梅)